



⑧ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 199 18 960 A 1

⑧ Int. Cl. 6:
G 01 R 35/00
G 01 R 27/28

DE 199 18 960 A 1

② Aktenzeichen: 199 18 960.9
② Anmeldetag: 27. 4. 99
④ Offenlegungstag: 11. 11. 99

⑥ Innere Priorität:
198 18 877. 3 28. 04. 98

⑦ Erfinder:
gleich Anmelder

⑦ Anmelder:
Hauermann, Holger, Dr., 83607 Holzkirchen, DE;
Fabry, Hans-Joachim, 12167 Berlin, DE; Bellmann,
Ralf, Dipl.-Ing., 91080 Marloffstein, DE

⑧ Vertreter:
Hafner und Kollegen, 90482 Nürnberg

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen
Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑨ Kalibrierverfahren zur Durchführung von Mehrfachmessung basierend auf dem 7-Term-Verfahren

⑩ Dargestellt wurde ein neues Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren. Dieses 7-Term-Multitportverfahren kann mit allen Zweitor-Kalibrierverfahren nach der 7-Term-Technik arbeiten. Für die i. d. R. $n + 1$ benötigten Kalibriermessungen genügt es, wenn man über die üblichen Standards für die 7-Term-Verfahren (z. B. TMR oder TLR) verfügt. Hierbei steht T für eine Durchverbindung und M für eine bekannte Impedanz. Mit L bezeichnet man eine Leitung und mit R einen Reflexionsstandard. Dieses Kalibrierverfahren benötigt einen Netzwerkansatz mit 2^n Meßstellen und ist auch in Analysatoren mit mehr Meßstellen anwendbar. Mit diesem Verfahren können von Systemfehlern (wie Übersprecher, Fehlenpassungen) befreite Messungen sowohl in koaxialen Systemen als auch auf Halbleitersubstraten (on-wafer) durchgeführt werden. Dieses Kalibrierverfahren bietet ganz neue Perspektiven bei der Vermessung von Mehrtoren, da es den Einsatz einer riesigen Menge von Kalibrierstandards erlaubt und folglich in jedem Leitungssystem eine Lösungsmöglichkeit der präzisen Realisierbarkeit der Standards erlaubt.

DE 199 18 960 A 1

DE 199 18 960 A 1

Beschreibung

Stand der Technik

5 Mithilfe Netzwerkanalysatoren (NWA) werden Ein- und Zweitorparameter von elektronischen Halbleiterbauelementen bis hin zu Antennen vermessen. Die Meßgenauigkeit von NWA läßt sich mithilfe einer Systemfehlerkorrektur erheblich verbessern.
 Bei der Systemfehlerkorrektur werden innerhalb des Kalibriervorganges Meßobjekte, die teilweise oder ganz bekannt sind, vermessen.

10 Aus diesen Meßwerten erhält man über spezielle Rechenverfahren Korrekturdaten. Mit diesen Korrekturdaten und einer entsprechenden Korrekturrechnung bekommt man für jedes beliebige Meßobjekt Meßwerte, die von Systemfehlern (Verkopplungen, Leckspannungen) befreit sind.
 Die in der Hochfrequenztechnik übliche Beschreibungsform des elektrischen Verhaltens von Schaltungen erfolgt über die Streuparameter. Sie verknüpfen nicht Ströme und Spannungen, sondern Wellengrößen miteinander. Diese Darstellung ist den physikalischen Größenheiten besonders angepaßt.

15 Bild 1 zeigt ein Zweitor, das durch seine Streumatrix $[S]$ gekennzeichnet sei. Die Wellen a_1 und a_2 seien die auf das Zweitor zulaufenden Wellen, b_1 und b_2 entsprechend die in umgekehrter Richtung sich fortpflanzenden Wellen. Es gilt die Beziehung:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

20 Das Mehrtor-Meßproblem besteht darin, daß alle Tore des Meßobjektes miteinander verkoppelt sind.
 25 Man erhält somit nicht mehr an einer Meßstelle ein Maß für die hinaufende, an der nächsten ein Maß für die reflektierte und letztlich an einer weiteren ein Maß für transmittierte Welle, das von den Abschlässen des Mehrtors unabhängig ist.
 Das allgemeine Problem von n-Toren wird der Übersichtshalber oft auf 3 Tore reduziert, so wie es auch in Bild 2 dargestellt ist. DUT steht für die englische Bezeichnung des Meßobjektes (device under test).
 30 Für dieses Fehlmodell ist dem Erfindern lediglich eine andere Lösung bekannt (Ferrero, [8]), die jedoch im Gegensatz zu den hier vorgeschlagenen Lösungswegen deutlich aufwendiger ist. Das dort vorgestellte Mehrtor-Kalibrierverfahren benötigt trotz gleicher Anzahl an Meßstellen eine Kalibriermessung mehr als die hier vorgestellten Verfahren. Des Weiteren müssen bei dem Verfahren von Ferrero sämtliche Kalibrierstandards vollständig bekannt sein, was deutliche Meßfehler zur Folge hat, da dortartige Standards nicht perfekt realisierbar sind.
 35 In modernen NWA (mit vier Meßstellen) ist das TRL-Kalibrierverfahren [1], [3] erhältlich. Bei diesem Verfahren brauchen, abgesehen von der Durchverbindung (T=Thru), die verbleibenden zwei Standards (L = Line, R = Reflct) nur noch teilweise bekannt zu sein. Daß das TRL-Verfahren lediglich als ein Spezialfall einer allgemeinen Theorie für das sogenannte Zwei-Fehler-Zweitor-Modell betrachtet werden kann, wurde in [5], [11] gezeigt.
 Weitere bekannte 7-Term Verfahren werden als TAN, TNA, TLR, LLR, LRL, TAR, TMR, TRM, UMSO, TMN, TMS,
 40 LMS, TMO, LMO, LNN, TZU, TZY, TYU, LZU, YYU, QSLOT usw. (z. B. [1], [5], [6], [7], [9], [10]) bezeichnet. I.d.R. setzen sich die Namen dieser Kalibrierverfahren aus den Kurzbezeichnungen der zur Kalibrierung nötigen Standards zusammen. Darüberhinaus gibt die Anzahl der Buchstaben in der Namensgebung auch die Anzahl der benötigten Kalibriermessungen wieder. Die Buchstaben in den oben aufgeführten Verfahren stehen für: A: Attenuator, M: Match U: Unknown, S: Short, O: Open, N: Network, Z: Serienwiderstand, Y: Parallelwiderstand, Q: Quick (kein Standardname, soll nur den Unterschied zum bekannten SOLT 12-Term Verfahren verdeutlichen). Bei vertauschten Reihenfolgen der Kalibrierstandardkürzel handelt es sich um ein und dieselben Verfahren, z. B.: LLR=LRL.
 All diese zur Klasse der 7-Term-Verfahren gehörenden Algorithmen lassen sich mit ihren Vorteilen in der dargestellten Entwicklung implementieren.

50 Erzielbare Vorteile

Mit der im Anschluß 1 angegebenen Erfindung ist das Problem eines geschlossenen, prinzipiell exakten und somit für die Praxis robusten Verfahrens für die Ermittlung der Korrekturkoeffizienten für das Mehrtor-Modell gelöst.
 Gegenüber dem Verfahren von Ferrero benötigt man bei diesen 7-Term-Mehrtoverfahren vier (z. B.: T1, T2, M und R) anstatt fünf (T1, T2, M, S und O) bekannte Hochfrequenz(HF)-Kalibrierstandards bei einer Dreitoranwendung. Die Ansprüche an den R-Standard sind auch viel geringer als die Ansprüche an den S- und O-Standard. Dieses ist für die Verfügbarkeit der Kalibrierstandards und somit für den praktischen Einsatz ein sehr wichtiger Aspekt.
 Bei dem TMR-Mehrtoverfahren stehen bei der Wahl der vier Kalibrierstandardkombinationen eine Vielzahl von Alternativen in der Reihenfolge der Kontaktierung der Ein-Tore zur Auswahl (Tabelle 1, 2). Jedoch ist vorgegeben, daß man von einem Tor aus mittels einer bekannten Zweitorverbindung (i.d.R. eine Durchverbindung, T) im n-Tor-Fall die weiteren Tore einmal verbinden muß. Des Weiteren muß an jedem Tor ein bekannter Impedanzabschluß (z. B. ein Wellensumpf; M) und ein Reflexionsstandard, dessen Reflexionsverhalten an jedem Tor lediglich gleich aber nicht bekannt sein muß, anschlossen werden. Variante 1 der Tabelle 1 bietet sich dadurch an, da Zuordnungsfehler nicht so einfach möglich sind, und Variante 2 der Tabelle 2 zeigt auf, daß auch bei einer n-Tor Multiportkalibrierung nicht mehr Standards als im Zweitorfall notwendig sind. Des Weiteren liefert die Variante 2 mit Sicherheit die besseren Meßresultate, da keine sogenannten Verspannungen auftreten, da keine unterschiedlichen Wellensumpe oder Reflexionsstandards eingesetzt werden müssen.

DE 199 18 960 A 1

Literatur

[1] Engen, G.F., Hoer, C.A., Thru-Reflect-Line: An Improved Technique for Calibrating the Dual Six Port Automatic Network Analyzer, IEEE MTT-27, Dec. 1979, pp. 987-993

5 [2] Engen, G.F., ECal: An Electronic Calibration System, Microwave Journal, Sep. 1993, pp. 152-157

[3] Hewlett Packard, Applying the HP 8510B TRL Calibration for Non-coaxial Measurements, Product Note 8510-8, Oct. 1987

[4] Hewlett Packard, Automating the HP 8410B Microwave Network Analyzer, Application Note 221A, Jun. 1980

[5] Eul, H.J., Schiek, B., A Generalized Theory and New Calibration Procedures for Network Analyzer Self-Calibration, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, MTT-39, March 1991, pp. 724-731

10 [6] Eul, H.-J., Methoden zur Kalibrierung von heterodynem und homodynem Netzwerkanalysatoren, Dissertationsschrift, Institut für Hoch- und Höchstfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1990

[7] Ferrero, A., Pisani, U., QSOLT: A New Calibration Algorithm for Two Port S-Parameter Measurements, 38th ARFTG Conf. Dig., San Diego, Dec. 1991, 5-6

15 [8] Ferrero, A., Pisani, U., Kerwin, K.J., A New Implementation of a Multiport Automatic Network Analyzer, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 40, Nov. 1992, pp. 2078-2085

[9] Ferrero, A., Pisani, U., Two-Port Network Analyzer Calibration Using an Unknown Thru, IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 2, Dec. 1992, pp. 505-507

[10] Heuermann, H., Sichere Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren für koaxiale und planare Leitungssysteme, Dissertationsschrift, Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1995, ISBN 3-8265-1495-5

20 [11] Heuermann, H., Schick, B., Robust Algorithms for Two Network Analyzer Self-Calibration Procedures, IEEE Trans. Instrum. Meas., IM-43, Feb. 1994, pp. 18-23

[12] Heuermann, H., Schiek, B., LNN (Line-Network-Network): Verfahren zur Kalibrierung von Netzwerkanalysatoren, Kleinheubacher Berichte, 1992, Bd. 36, pp. 327-335

25 [13] Heuermann, H., Schiek, B., Error Corrected Impedance Measurements with a Network Analyzer, IEEE Trans. Instrument. Meas., IM-44, Apr. 1995, pp. 295-299

Patentansprüche

30 1. Verfahren zum Kalibrieren eines n Meßtore und mindestens $2n$ Meßstellen aufweisenden vektoriellen Netzwerkanalysators durch aufeinanderfolgende Messung der Reflexions- und Transmissionsparameter an $n+1$ verschiedenen zwischen den Meßtoren in beliebiger Reihenfolge geschalteten Kalibrierstandards, dadurch gekennzeichnet, daß

(a) alle Kalibrierstandards aus vollständig bekannten n -Toren, Zweiporten oder einfachen bis n -fachen Eintoren (n -Tor bestehend aus n Eintoren) bestehen müssen.

35 (b) mindestens ein Zweiport endlicher Transmissionsdämpfung als Kalibrierstandard zwischen den Meßtoren geschaltet werden muß.

(c) die Kalibrierstandards folgender bekannter 7-Term-Versahren (TAN, TNA, LAN, TRL, TLR, LLR, LRL, TAR, TMR, TRM, TMS, LMS, TMO, LMO, UMSO, TMN, LNN, TZU, TZY, TYU, LYU, ZZU, YYU, QSOLT z. B. in [10]=ISBN 3-8265-1495-5 und seit 1996 im Handel als Fachbuch erhältlich) zwischen dem Meßtor 1 und den weiteren Meßtoren 2 bis n in bekannter Reihenfolge [10] vermessen werden müssen.

40 2. Verfahren nach Anspruch 1 im Einsatz mit vorhandenen koaxialen oder planaren Kalibrierstandards, dadurch gekennzeichnet, daß

(a) die ersten $n-1$ Kalibermessungen an einem Zweiport, das mittels der direkten Verbindung der Meßtore (Durchverbindung, $T = \text{Thru}$) oder einer kurzen angepaßten Leitung ($L = \text{Line}$) bekannter Länge und Dämpfung realisiert ist und das zwischen dem Meßtor 1 und den Meßtoren 2 bis n angeschlossen wird, durchgeführt werden.

45 (b) eine weitere Kalibermessung an einem n -Eintor, das mittels n bekannter Impedanzen (z. B. Wellenabschlüsse mit 50Ω , $M = \text{Match}$) realisiert ist, durchgeführt wird.

(c) eine weitere Kalibermessung an einem n -Eintor, das mittels n nicht-idealener Kurzschlüsse oder Leerläufe ($R = \text{Reflect}$) realisiert ist, durchgeführt wird.

50 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2 im Einsatz mit vorhandenen koaxialen oder planaren Kalibrierstandards, dadurch gekennzeichnet, daß

(a) die ersten $n-1$ Kalibermessungen an einem Zweiport, das mittels der direkten Verbindung der Meßtore (Durchverbindung, $T = \text{Thru}$) oder einer kurzen angepaßten Leitung bekannter Länge ($L = \text{Line}$) bekannter Länge und bekannten Transmissionseigenschaften realisiert ist und das zwischen dem Meßtor 1 und den Meßtoren 2 bis n angeschlossen wird, durchgeführt werden.

55 (b) die weiteren $n-1$ Kalibermessungen an einem Zweiport, das mittels einer kurzen angepaßten Leitung unbekannter Länge ($L = \text{Line}$) und unbekannten Transmissionseigenschaften realisiert ist und das zwischen dem Meßtor 1 und den Meßtoren 2 bis n angeschlossen wird, durchgeführt werden.

(c) die eine weitere Kalibermessung an einem n -Eintor, das mittels n nichtidealener Kurzschlüsse oder Leerläufe ($R = \text{Reflect}$) realisiert ist, durchgeführt wird.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

65

DE 199 18 960 A 1

Weitere Ausgestaltung der Erfindung

Die vorteilhaften Ausgestaltungen der Erfindung vom Hauptanspruch 1 sind in den Unteransprüchen 2 und 3 dargestellt.

Dem Hauptanspruch 1 ist hinzuzufügen, daß beim Einsatz von Transfer- oder Kalibrierstandards auch Elemente aus konzentrierten Bauelementen verwendet werden können. Dieser allgemeine Anspruch schließt den Einsatz der bekannten 7-Term Kalibrierverfahren mit den Namen: TAN, TNA, TRL, TLR, LLR, LRL, TAR, TMR, TRM, UMSO, TMN, TMS, LMS, TMO, LMO, LNN, TZU, TZY, TYU, LZY, ZZU, YYU, QSLOT usw. (z. B. [1], [6], [7], [9], [10]) ein. Sämtliche Verfahren werden nicht in ihrer klassischen Einsatzform verwendet, sondern werden $n-1$ mal bezogen aus einem Referenztor (hier immer Tbr 1) eingesetzt. Darauf folgt siebt das Referenzmeßtor bis zu n -mal und jedes weitere Meßtor einmalig die Standards, wie es auch in den zugehörigen Veröffentlichungen und Patentschriften ([1], [5], [6], [9], [10], [11], [12], [13], Deutsche Offenlegungsschriften 39 12 795, 41 25 624, 43 32 273, US-Patent 5440236) dargestellt wurde, aber der Gesamtkalibrierprozeß zur hier vorgestellten Multiport 7-Term-Kalibrierung hebt sich deutlich von den patentierten Verfahren ab.

Anspruch 2 verdeutlicht den Einsatz des in der Praxis sehr sinnvollen TMR-Kalibrierverfahrens. In den Tabellen 1 und 2 sind einige mögliche Varianten der Kontaktierungsreihenfolge aufgelistet. Schließt man sämtliche Standards nacheinander an, so kann man die Anzahl der Kalibriermessungen auf $2n+n-1$ erhöhen.

Anspruch 3 beschreibt ebenfalls ausführlich wie eine 7-Term-Mehrtor-Kalibrierung, die das für die Praxis wichtige TLR-Verfahren einsetzt, auszusehen hat. Ein sehr interessanter Fall ist die Vermessung von Dreitoren, da hierfür nur ein relativ leichter verfügbarer NWA mit vier Meßstellen notwendig ist.

Als Blockschaltbild ist der interessante Sonderfall eines 3-Tor Mehrtor-Netzwerkanalysesystems im Bild 2 illustriert. Das Bild 2 zeigt auf, wie ein derartiger Aufbau zu realisieren ist und dient als Grundlage für ein sowohl erklärenden als auch mathematischen Beschreibung.

Im Bild 2 wird dargestellt, wie das Signal einer Quelle 17 über einen Umschalter 16, dessen Eigenschaften Reproduzierbarkeit, Reflexion, Laufzeitstabilität usw. nicht in die Meßgenauigkeit eingehen, auf die drei Zweige 18, 19 und 20 gelichtet wird. Die als ideal angenommenen Meßstellen 15 nehmen jeweils ein Maß für die hinaufende und transmittierende Welle auf. Sämtliche Fehler werden in den Fehlermatrizen 13, 14a und 14b zusammengefaßt. An den Toren 10, 11 und 12 ist das Meßobjekt 21 (DUT) mit dem Netzwerkanalysator verbunden. Mit derartig geringen Ansprüchen an den Kalibrierstandards läßt sich das 7-Term-Mehrtor-Kalibrierverfahren auch ausgezeichnet für automatisierte Kalibrierungen von NWA ([2]) einsetzen.

Beschreibung der 7-Term Mehrtorverfahren

Die Ausgangsbasis für die mathematische Beschreibung der 7-Term Mehrtorverfahren (oft auch Multiportverfahren genannt) bildet das Fehlermodell im Bild 2. Der Einfachheit halber wollen wir die mathematische Herleitung nur für den in der Praxis interessantesten Fall, der Vermessung von Dreitoren, durchführen. Die Verallgemeinerung dieser Vorgehensweise zu n -Toren kann auf einfache Art und Weise durchgeführt werden, indem man einen Umschalter mit n Ausgangspositionen vorsieht und für jedes weitere Tor den Meßobjektes zwei zusätzliche Meßstellen berücksichtigt.

Zur Ermittlung der klassischen Fehlermatrizen des 7-Term Modells wird eine Zweitorkalibrierung zwischen dem Referenztor mit der Fehlermatrix $[A]$ und nacheinander den Toren mit den Fehlermatrizen $[B_i]$ durchgeführt. Die Bezeichnung 7-Term Modell röhrt von der Tatsache, daß die zugehörigen 2 · 2 Fehlermatrizen $[A]$ und $[B_i]$ insgesamt 7 Fehlerterme enthalten, da immer eine der 8 enthaltenen Größen auf 1 gesetzt werden kann.

Im weiteren ist es vorteilhaft, die mathematische Formulierung des Zweitormodells in der inversen Form der angegebenen Transmissionsparameter anzusetzen:

$$[G] = [A]^{-1}, [H_i] = [B_i]^{-1}, i = 1, 2 \quad (2)$$

wobei für die Ein- und Ausgänge an den Fehlernetzwerken

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ a_1 \end{pmatrix} = [G] \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} a_i \\ b_i \end{pmatrix} = [H_i] \begin{pmatrix} m_{2i-1} \\ m_{2i} \end{pmatrix} \quad (3)$$

gilt. Diese Gleichung lassen sich nach den a_i und b_i Wellengrößen auflösen und in der Gleichung

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} & & \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \\ Sx & & \end{bmatrix} \quad (4)$$

einsetzen. Hierbei bekommt man für jede Schalterstellung die Werte einer Matrixspalte, was letztlich zu einem linearen Gleichungssystem bestehend aus zwei $n \cdot n$ Meßwertmatrizen und der $n \cdot n$ Streumatrix führt. Löst man dieses Gleichungssystem nach der (Sx) -Matrix auf, so stehen einem die fehlerkorrigierten Streuparameter eines n -Tores zur Verfügung.

ZEICHNUNGEN SEITE 1

Nummer: DE 199 18 980 A1
 Int. Cl. 6, G 01 R 35/00
 Offenlegungstag: 11. November 1999

Kal.-Schritt	Zwei- oder Eintorkalibrierstandards an den Toren					
	1	2	3	1-2	1-3	2-3
1.				T		
2.					T	
3.	M	M	M			
4.	R	R	R			

Tabelle 1: Notwendige Kalibriermessungen des 7-Turm-Mehrstorverfahrens für Dreitoranwendungen mit TMR-Standards (1. Variante)

Kal.-Schritt	Zwei- oder Eintorkalibrierstandards an den Toren					
	1	2	3	1-2	1-3	2-3
1.			R	T		
2.		M			T	
3.	M	R				
4.	R		M			

Tabelle 2: Notwendige Kalibriermessungen des 7-Turm-Mehrstorverfahrens für Dreitoranwendungen mit TMR-Standards (2. Variante)

ZEICHNUNGEN SEITE 2

Nummer: DE 199 18 960 A1
Int. Cl. 6: G 01 R 35/00
Offenlegungstag: 11. November 1999

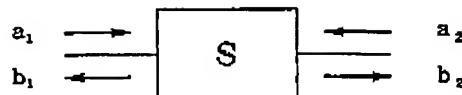


Bild 1: Zur Erläuterung der Streumatrix

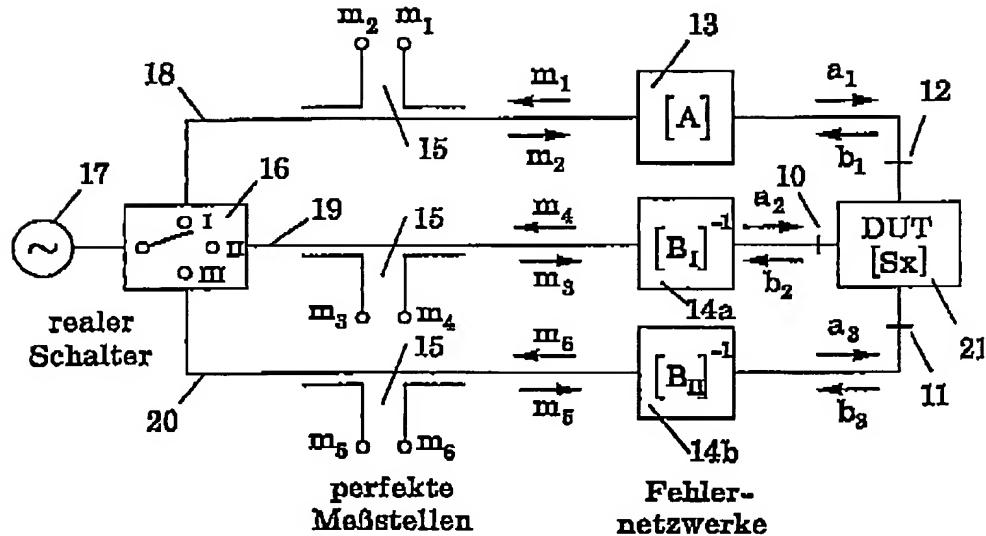


Bild 2: Blockschaltbild eines Netzwerkanalysators mit sechs Meßstellen zur Vermessung von Dreitoren unter Verwendung des Mehrtormodells